

16

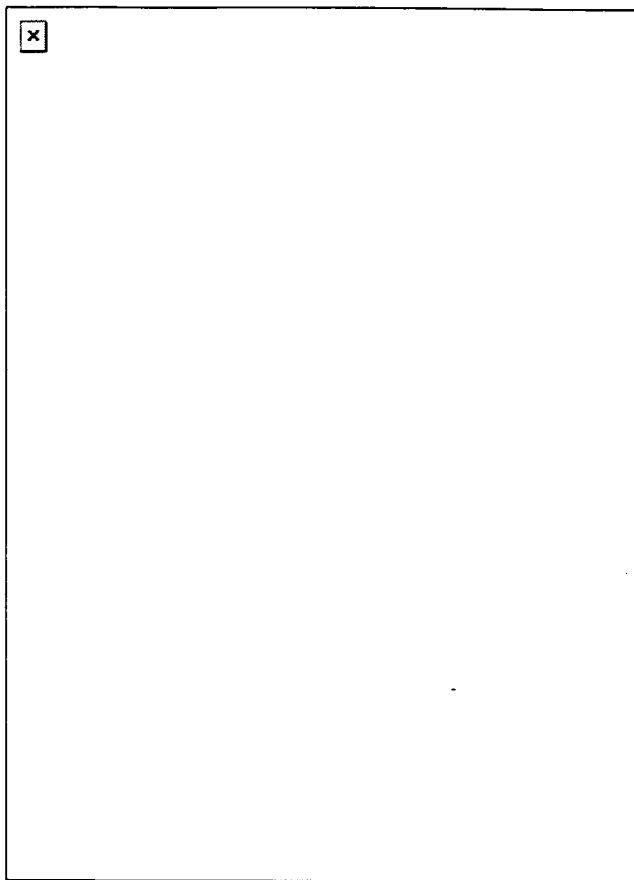
INJECTION SYNCHRONIZATION TYPE NARROW-BAND LASER

Patent number: JP11298083
Publication date: 1999-10-29
Inventor: TANAKA HIROKAZU; WAKABAYASHI OSAMU
Applicant: KOMATSU LTD
Classification:
- **International:** H01S3/137; H01S3/109; H01S3/23
- **European:**
Application number: JP19980105055 19980415
Priority number(s):

Abstract of JP11298083

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide an injection synchronization type narrow-band laser by which laser light of short wavelength of 193 nm or so can be maintained for a long time, with high stability of wavelength.

SOLUTION: An amplifying medium 3 of an oscillator stage A is excited by pumping light from a pumping laser 11. Fundamental wave light L1 oscillated between a rear mirror 1 and a front mirror 4 is input in a wavelength converting part 12 and is converted into a quadruple harmonic light L2 and is further input in an amplifying stage B via total reflecting mirrors 13 and 14 and is output as output light L3 which is amplified harmonic light L2. At the oscillator stage A, the fundamental wave light L1 is monitored by a wavelength monitor 6 and its wavelength is controlled, in such a way that a wavelength controller 7 has a desired narrow-band wave light L1. In this way, when the output light L3 is a light in the ultraviolet region, since the wavelength control is applied on a long-wave and low-power fundamental wave light L1 in a visible region, wavelength can be controlled easily with high accuracy and stability.



Data supplied from the esp@cenet database - Worldwide

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平11-298083

(43)公開日 平成11年(1999)10月29日

(51)Int.Cl.⁶

H01S 3/137
3/109
3/23

識別記号

F I

H01S 3/137
3/109
3/23

Z

審査請求 未請求 請求項の数8 O L (全 15 頁)

(21)出願番号 特願平10-105055

(22)出願日 平成10年(1998)4月15日

(71)出願人 000001236

株式会社小松製作所
東京都港区赤坂二丁目3番6号

(72)発明者 田中 宏和

栃木県小山市横倉新田400 株式会社小松
製作所小山工場内

(72)発明者 若林 理

栃木県小山市横倉新田400 株式会社小松
製作所小山工場内

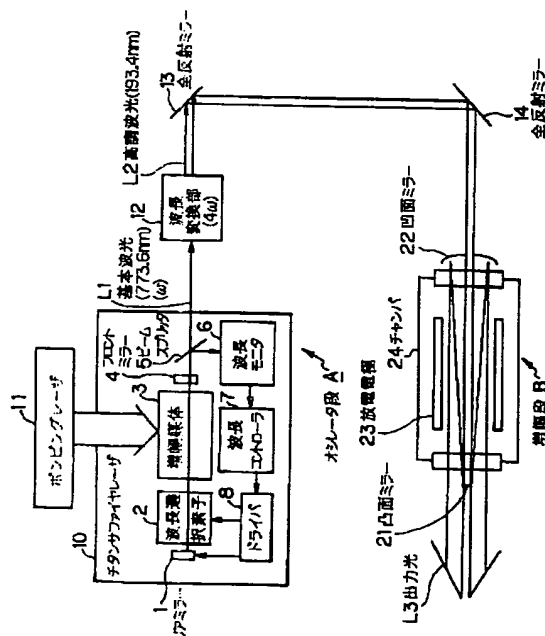
(74)代理人 弁理士 木村 高久

(54)【発明の名称】 注入同期型狭帯域レーザ

(57)【要約】

【課題】193nm等の短波長のレーザ光を高い波長安定性をもって長期間維持することができる注入同期型狭帯域化レーザを提供する。

【解決手段】ポンピングレーザ11からのポンピング光によってオシレータ段Aの増幅媒体3が励起され、リアミラー1とフロントミラー4との間で発振した基本波光L1は、波長変換部12に入力され、4倍の高調波光L2に波長変換され、さらに全反射ミラー13、14を介して増幅段Bに入力され、高調波光L2が増幅された出力光L3として出力される。オシレータ段Aでは、基本波光L1を波長モニタ6によってモニタし、波長コントローラ7が所望の狭帯域化された基本波光L1となるように波長制御を行う。これによって、出力光L3が紫外領域の光である場合、可視領域の長波長でかつ低パワーの基本波光L1で波長制御がなされるため、高精度で安定した波長制御を容易に行うことができる。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 オシレータ段でレーザ発振した発振波長を波長変換手段によって高調波光に波長変換し、この高調波光を増幅段によって増幅出力する注入同期型狭帯域レーザにおいて、

前記オシレータ段の発振波長をモニタして該発振波長を所望の波長に制御する波長制御手段を具備したことを特徴とする注入同期型狭帯域レーザ。

【請求項2】 前記オシレータ段内の共振器内に、所定倍の中間高調波に波長変換する中間波長変換手段を設け、

前記中間波長変換手段は、該中間波長変換手段を前記共振器内に設けない場合の発振波長と前記高調波光との間における前記所定倍の中間高調波に変換し、

前記波長制御手段は、前記オシレータ段から出力された中間高調波の波長をモニタして該オシレータ段がレーザ発振する中間高調波の波長を所望の中間高調波の波長に制御することを特徴とする請求項1に記載の注入同期型狭帯域レーザ。

【請求項3】 前記波長制御手段は、前記波長変換手段内で生成される中間高調波の波長をモニタして前記オシレータ段における前記発振波長を所望の波長に制御することを特徴とする請求項1に記載の注入同期型狭帯域レーザ。

【請求項4】 前記波長制御手段は、前記波長変換手段の前段のレーザ光の波長をモニタして前記オシレータ段の前記発振波長を所望の波長に制御することを特徴とする請求項1に記載の注入同期型狭帯域レーザ。

【請求項5】 前記波長制御手段は、前記波長変換手段の後段のレーザ光の波長をモニタして前記オシレータ段の前記発振波長を所望の波長に制御することを特徴とする請求項1に記載の注入同期型狭帯域レーザ。

【請求項6】 前記波長制御手段がモニタするレーザ光を一部サンプリング抽出する抽出手段と、既知の波長の光を吸収する吸収セルと、前記抽出手段によって抽出され、前記吸収セルを通過したレーザ光の光強度を検出する光強度検出手段とをさらに具備し、

前記波長制御手段は、前記光強度が最小となるように前記オシレータ段の発振波長を制御し、この光強度が最小となる前記既知の波長の干渉縞を記憶して較正用干渉縞とし、この較正用干渉縞を用いて前記発振波長または前記中間高調波の波長のモニタを定期的に較正することを特徴とする請求項1～5のうちのいずれか1項に記載の注入同期型狭帯域レーザ。

【請求項7】 前記高調波光は、紫外領域の光であり、前記発振波長または前記中間高調波光は、可視領域又は

近赤外領域の光であることを特徴とする請求項1～6のうちのいずれか1項に記載の注入同期型狭帯域レーザ。

【請求項8】 前記オシレータ段と前記波長変換手段との間に前記発振波長または前記中間高調波光を増幅する増幅手段をさらに具備したことを特徴とする請求項1～7のうちのいずれか1項に記載の注入同期型狭帯域レーザ。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、注入同期（インジェクションロック）型狭帯域レーザに関し、特に193.4nm等の短波長の紫外レーザ光を高い波長安定性をもって狭帯域化された増幅光を出力することができる注入同期型狭帯域レーザに関する。

【0002】

【従来の技術】従来、狭帯域化KrFエキシマレーザでは、248nmの紫外レーザ光をパルス発振する際、出力レーザ光の一部を取り出し、レーザ出力とレーザ波長とを検出し、波長制御及び出力制御を行っていた。

【0003】例えば、図19は、従来の狭帯域化エキシマレーザの概要構成を示し、この狭帯域化エキシマレーザは、放電電極102のパルス放電によってレーザチャンバ101内に充填されたレーザガスが励起され、フロントミラー105とリアミラー104とで構成される共振器によってレーザ発振し、フロントミラー105からレーザ出力光LAが出力される。レーザ出力光LAの一部はビームスプリッタ106によって取り出され、波長モニタ107に入力される。波長モニタ107では、ビームスプリッタ107e、エタロン107b、レンズ107cを介して入力されたレーザ出力光LAの干渉縞がラインセンサ107dに撮像され、その結果が波長コントローラ108に入力される。また、波長モニタ107内には、レーザ出力光LAの波長に近い基準光107aを発する光源を有し、基準光107aは、ビームスプリッタ107e、エタロン107b、レンズ107cを介して出力され、基準光107aの干渉縞がラインセンサ107dに撮像されて波長コントローラ108に入力される。波長コントローラ108は、入力されたレーザ出力光の干渉縞と基準光の干渉縞とからレーザ出力光の波長を算出するとともに、目標波長との波長ずれを算出し、この算出結果をもとに、ドライバ109を介して、狭帯域化モジュール103内のリアミラー104及び波長選択素子110を駆動して所望の発振波長となるように制御する。このようなフィードバック制御によってレーザ出力光LAの波長は目標波長に制御される。

【0004】一方、狭帯域化されたレーザ光を発生するオシレータ段とこのレーザ光を増幅する増幅段とを連結して、増幅段から出力の大きな狭帯域化されたレーザ光を出力する同期注入（インジェクションロック）型レーザが知られており、このインジェクションロック型レー

ザを用いることによって狭帯域化されたレーザ光を得ることができる(特開昭63-54786号参照)。

【0005】また、露光装置では、極微細加工をさらに精密に行うことができる要求から、さらに波長が短く、安定し、微細加工が可能な出力をもった紫外レーザ光を発振できるレーザ装置の出現が望まれている。

【0006】このため、例えば図20に示すように、固体レーザを用いたインジェクションロック型レーザの研究が行われている。このインジェクションロック型レーザでは、193nmの波長のレーザ光を出力することができる。すなわち、Nd:YAGレーザ121が発振したレーザ光の第2高調波(532nm)をポンピング光として、狭帯域化チタンサファイヤレーザ122を発振させ、発振した773.6nmのレーザ光を波長変換部123で4倍の高調波(193nm)のレーザ光LB1として出力する。そして、このレーザ光LB1は、全反射ミラー131、132を介して増幅段124に入力され、増幅されたレーザ光LB2として出力される。この増幅段124における増幅は、オシレータ段120のレーザ発振に同期して放電電極126が放電し、レーザ励起ガスが充填されたチャンバ125内に入力されたレーザ光LB1が凸面ミラー127、凹面ミラー128を介して通過出力されるまでの間に誘導放出することによって行われる。これによって、狭帯域化された193nmのレーザ光を得ることができる。

【0007】

【発明が解決しようとする課題】しかし、図20に示すインジェクションロック型レーザでは、レーザ光を狭帯域化することができるが、露光装置に用いる場合、波長安定性が $\pm 0.1\text{pm}$ 、波長の制御範囲が $193.3 \pm 0.2\text{nm}$ であることが要求され、このような波長制御されたレーザ光を得ることができないという問題点があり、現実の露光装置用のレーザ光として用いることができない。

【0008】ここで、インジェクションロック型レーザからの出力光の一部をモニタし、フィードバックによる波長制御を行うことが考えられるが、次のような理由によって、このような波長制御は困難である。すなわち、(1)ArFのエキシマによる発振波長(193nm)のように波長が短くなると、耐久性のある適切な母材およびコーティング材がない。例えば、蛍石(CaF₂)のようなフッ化物結晶材料であっても耐久性に問題があり、反射防止膜等のARあるいはHRコートも耐久性に問題がある。

【0009】(2)ArFのエキシマによる発振波長(193nm)のように波長が短くなると、波長および線幅を高精度に検出することが困難である。具体的には、193nmの波長に適合した基準光源が存在しない。また、193nmの波長に適合した吸収線がない。さらに193nm用の高精度のエタロンを製造できな

い。さらには、波長モニタ自体の耐久性もない。

【0010】一方、インジェクションロック型レーザでは、オシレータ段において狭帯域化を図っており、このオシレータ段におけるレーザ光の強度は低いため、図19に示すような単一段のレーザに比較して波長選択素子等の光学素子の寿命を長くすることができる。

【0011】そこで、本発明は、かかる問題点を除去し、193nm等の短波長のレーザ光を高い波長安定性をもって長期間維持することができる注入同期型狭帯域化レーザを提供することを目的とする。

【0012】

【課題を解決するための手段および効果】第1の発明は、オシレータ段でレーザ発振した発振波光を波長変換手段によって高調波光に波長変換し、この高調波光を増幅段によって増幅出力する注入同期型狭帯域レーザにおいて、前記オシレータ段の発振波長をモニタして該発振波長を所望の波長に制御する波長制御手段を具備したことを特徴とする。

【0013】第1の発明では、高調波に波長変換される前の低い周波数の発振波光の波長を制御するようにしているので、波長が長くなった分、精度の高い波長制御を行うことができるとともに、波長制御に用いられる光学素子の寿命が飛躍的に長くなる。

【0014】第2の発明は、第1の発明において、前記オシレータ段内の共振器内に、所定倍の中間高調波に波長変換する中間波長変換手段を設け、前記中間波長変換手段は、該中間波長変換手段を前記共振器内に設けない場合の発振波光と前記高調波光との間における前記所定倍の中間高調波に変換し、前記波長制御手段は、前記オシレータ段から出力された中間高調波の波長をモニタして該オシレータ段がレーザ発振する中間高調波の波長を所望の中間高調波の波長に制御することを特徴とする。

【0015】これにより、第2の発明では、第1の発明と同様な作用効果を奏するとともに、中間波長のレーザ光を効率よく発振することができ、注入同期型狭帯域レーザの全体の発振効率を向上させることができる。

【0016】第3の発明は、第1の発明において、前記波長制御手段は、前記波長変換手段内で生成される中間高調波の波長をモニタして前記オシレータ段における前記発振波長を所望の波長に制御することを特徴とする。

【0017】第3の発明では、第1の発明と同様な作用効果を奏するとともに、波長モニタとして最適な波長検出素子を割り当てることができるという自由度が増大するという効果も有する。

【0018】第4の発明は、第1の発明において、前記波長制御手段は、前記波長変換手段の前段のレーザ光の波長をモニタして前記オシレータ段の前記発振波長を所望の波長に制御することを特徴とする。

【0019】これにより、第4の発明では、第1の発明と同様な作用効果を奏する。

【0020】第5の発明は、第1の発明において、前記波長制御手段は、前記波長変換手段の後段のレーザ光の波長をモニタして前記オシレータ段の前記発振波長を所望の波長に制御することを特徴とする。

【0021】これにより、第5の発明では、第1の発明と同様な作用効果を奏する。

【0022】第6の発明は、第1から第5の発明において、前記波長制御手段がモニタするレーザ光を一部サンプリング抽出する抽出手段と、既知の波長の光を吸収する吸収セルと、前記抽出手段によって抽出され、前記吸収セルを通過したレーザ光の光強度を検出する光強度検出手段とをさらに具備し、前記波長制御手段は、前記光強度が最小となるように前記オシレータ段の発振波長を制御し、この光強度が最小となる前記既知の波長の干渉縞を記憶して較正用干渉縞とし、この較正用干渉縞を用いて前記発振波長または前記中間高調波の波長のモニタを定期的に較正することを特徴とする。

【0023】これにより、第6の発明では、さらに高精度の波長制御が可能となる。

【0024】第7の発明は、第1から第6の発明において、前記高調波光は、紫外領域の光であり、前記発振波光または前記中間高調波光は、可視領域又は近赤外領域の光であることを特徴とする。

【0025】第7の発明では、第1から第6の発明と同様な作用効果を奏する。特に、高調波光の波長が紫外領域となるとこの波長を検出する素子がないか、あっても精度が低く、さらには、その波長の短さから検出する素子の製造が困難であるのに対し、発振波光あるいは高調波光が可視領域又は近赤外領域であるため、波長検出素子が豊富であり、信頼性も高いため、高精度の波長制御を容易に行うことができ、安定性も増すという効果を有する。

【0026】第8の発明は、第1から第7の発明において、前記オシレータ段と前記波長変換手段との間に前記発振波光または前記中間高調波光を増幅する増幅手段をさらに具備したことを特徴とする。

【0027】第8の発明では、高精度に波長制御された発振波光または中間高調波光を該発振波光または中間高調波光段階で増幅するので、非常に増幅率の高い狭帯域化レーザ光を出力することができる。

【0028】

【発明の実施の形態】以下、図面を参照して本発明の実施の形態について説明する。

【0029】図1は、本発明の第1の実施の形態であるインジェクションロック型狭帯域レーザの全体構成を示す図である。

【0030】図1において、このインジェクションロック型狭帯域レーザはオシレータ段A、波長変換部12、および増幅段Bとから構成される。

【0031】オシレータ段Aは、ポンピングレーザ11

と、これによって励起され、基本波光L1を出力するチタンサファイヤレーザ10とからなる。

【0032】ポンピングレーザ11としては、アルゴンイオンレーザ、YAGレーザ、YLFレーザ等が用いられ、アルゴンイオンレーザの場合は488nm、515nm等のマルチライン、YAGレーザの場合は第2高調波(532nm)、YLFレーザの場合は第2高調波(527nm)がポンピング光として使用される。

【0033】チタンサファイヤレーザ10の詳細構成については後述するが、ポンピングレーザ11からのポンピング光が増幅媒体3としてのチタンサファイヤロッドに入射されると、増幅媒体3は、773.6nmのレーザ光を含む光を発生し、リアミラー1とフロントミラー4とで構成される共振器とこの共振器内の波長選択素子2等によって773.6nmの狭帯域のレーザ光を増幅発振して基本波光L1として波長変換部12に出力する。チタンサファイヤレーザ10内には、波長制御機能を有し、ビームスプリッタ5によって基本波光L1の一部を取り出し、波長モニタ6によって基本波光L1の波長を検出し、この検出した波長をもとに、波長コントローラ7がドライバ8を介して波長選択素子2及びリアミラー1を調整して、狭帯域の773.6nmの基本波光L1が出射されるようにフィードバック制御される。

【0034】波長変換部12は、入射された基本波光L1を和周波混合によって4倍の高調波である193.4nmのレーザ光に変換し、高周波光L2として増幅段Bに入力する。この波長変換部12は、非線形光学効果をもつ波長変換素子によって実現される。例えば、非線形光学素子を3つ用い、最初の非線形光学素子によって、入力された波長 ω をもつレーザ光は、波長 ω と 2ω のレーザ光を生成し、次の非線形光学素子によって波長 ω と波長 3ω ($\omega+2\omega$)のレーザ光を生成し、さらに次の非線形光学素子によって波長 ω と 4ω ($\omega+3\omega$)のレーザ光を生成し、この波長 4ω のレーザ光を透過させるミラーを用いて出力させるようにする。この高調波光L2は、全反射ミラー13、14を介して増幅段Bに入力される。

【0035】増幅段Bのチャンバ24内には、193nmのレーザ光を発生することができるArFガスが充填され、このArFガスをエキシマ状態に励起する放電電極23を有する。入力された高調波光L2は、凹面ミラーのカップリングホールを介してチャンバ24内に入力し、凸面ミラー21を介して反射し、さらに凹面ミラー22に反射し、出力光L3として出力する。高調波光L2がチャンバ23内を往復する間に、誘導放出を行うことにより、高調波光L2が増幅された出力光L3として出力される。この場合、ポンピングレーザ11、チタンサファイヤレーザ10、及び増幅段Bの放電電極23の放電タイミングを同期させる必要がある。

【0036】次に、図2を参照してチタンサファイヤレ

ーザ10の構成、特にチタンサファイアレーザ10内における波長制御のための構成について説明する。

【0037】図2において、リアミラー1とフロントミラー4とで構成される共振器内のチタンサファイアロッド3にポンピング光L0が入射すると、チタンサファイアロッド3はレーザ光を発し、共振器および波長選択素子としてのエタロン2によって狭帯域化された773.6nmの基本波光L1が出力される。基本波光L1の一部は上述したようにビームスプリッタ5によってサンプルされて取り出され、波長モニタ6内に入力される。

【0038】波長モニタ6は、ビームスプリッタ5からの基本波光L1を散乱板31によって散乱し、この散乱された光はビームスプリッタ32を介してモニタエタロン33に入射され、集光レンズ34を介してラインセンサ35上に干渉縞を生成する。一方、773.6nmの基本波光の波長に近い基準光としての772.276nmラインを発光するアルゴンランプ36がコリメータレンズ37の焦点に配置され、干渉フィルタ38によってアルゴンランプ36が発生する光のうち772.276nmの光のみを透過させ、この透過した基準光は、ビームスプリッタ32、モニタエタロン33、集光レンズ34を介してラインセンサ35上に干渉縞を生成する。ラインセンサ35によって撮像された基本波光および基準光の干渉縞は、波長コントローラ7に送出される。

【0039】波長コントローラ7は、基本波光の干渉縞と基準光の干渉縞とを比較することによって、現在の基本波光の絶対波長を算出し、増幅段Bから出力される出力光L3の波長193.3nmの4倍の波長である基本波目標波長とのずれを算出し、このずれを補正すべくドライバ8を介してエタロン2を制御するとともに、圧電素子であるPZTを駆動する制御を行ってリアミラーの位置を調整し、共振器長を変化させる波長制御を行う。なお、エタロンの制御とは、エタロン2の角度を変化させることによってレーザ光のエタロン2への入射角度を変化させたり、エタロンのエアギャップ間隔を調整したり、エタロンの温度を変化させたり、エタロンのエアギャップ内の温度を変化させたりすることによって、レーザ光の波長選択を適切に行う制御である。

【0040】次に、図3から図9を参照して、波長コントローラ7の波長制御処理について説明する。

【0041】まず、図3は、波長制御処理の全体フローチャートを示している。図3において、最初に目標波長 λ_{at} が入力される(ステップS1)。この目標波長とは、出力光L3の波長193.3nmの波長である。次に、基本波目標波長 $\lambda_{ot} (= \lambda_{at} * n)$ を算出する(ステップS2)。この基本波目標波長 λ_{ot} は、チタンサファイアレーザ10からの高調波光L1の波長に対する目標波長である。その後、現在の基本波波長 λ_o を検出する基本波波長検出処理を行い(ステップS3)、基本波目標波長 λ_{ot} と検出された基本波波長 λ_o との差 $\Delta\lambda$ を

算出する(ステップS4)。その後、この $\Delta\lambda$ をなくすように、波長選択素子(エタロン)2等を駆動制御する波長制御処理を行い(ステップS5)、ステップS1に移行し、上述した処理を繰り返す。

【0042】図4(a)は、ステップS3の基本波波長検出処理手順を示すフローチャートである。図4(a)において、まず基本波光の干渉縞を検出する処理を行い(ステップS11)、その後、検出された基本波光の干渉縞と基準光の干渉縞とから現在の基本波光の絶対波長 λ_o を算出し(ステップS12)、ステップS3にリターンする。

【0043】図4(b)は、ステップS11の基本波光の干渉縞検出処理を示すフローチャートであり、まず、タイマの時間Tが、基準光の読み込み周期Kに到達したか否かを判断し(ステップS21)、周期Kに到達した場合に、基準光の干渉縞を検出し(ステップS22)、その後タイマの時間Tを0にリセットし(ステップS23)、ステップS21に移行し、上述した処理を繰り返す。

【0044】次に、図5は、ステップS5の波長制御処理手順を示すフローチャートであり、波長制御処理は、まず、チタンサファイアレーザ10の共振器の選択波長が $\Delta\lambda$ 分変化するように共振器長を変化させる中心波長制御処理を行い(ステップS31)、その後、チタンサファイアレーザ10からの基本波光L1の出力または中心波長が最大となるように、エタロン2等の波長選択素子の選択波長を制御する重ね合わせ制御処理を行って(ステップS32)、ステップS5にリターンする。

【0045】ここで、図7(a)は、波長に対する光強度との関係を示す図であり、ステップS31の中心波長制御とは、現在発振している中心波長 λ_o の選択を基本波目標波長 λ_{ot} に変化させる処理を行うものである。この変化は、上述したようにPZT9を駆動させてリアミラー1の位置を変化させ、これによってリアミラー1とフロントミラー4との間の共振器長を変化させるものである。これにより、共振器による選択波長は適正なものとなる。

【0046】次に、図6は、ステップS32の重ね合わせ制御処理手順を示すフローチャートであり、まず波長コントローラ7は、最初に読み込んだ中心波長の初期パワーをP0と設定し(ステップS41)、さらにエタロン2の選択波長をプラス側に所定波長分シフトさせる(ステップS42)。その後、中心波長パワーPを読み込み(ステップS43)、この読み込んだ中心波長パワーPと初期パワーP0とを比較する(ステップS44)。中心波長パワーPが初期パワーP0より大きい場合は、エタロン2の選択波長を前回のシフト方向と同一の方向に所定波長分シフトさせ(ステップS45)、現在の中心波長パワーPをP0に設定して(ステップS47)、ステップS43に移行し、中心波長パワーPがP

0となるまで処理を繰り返す。また、中心波長パワーPが初期パワーP0より小さい場合は、エタロン2の選択波長を前回のシフト方向と逆の方向に所定波長分シフトさせ(ステップS46)、現在の中心波長パワーPをP0に設定して(ステップS47)、ステップS43に移行し、中心波長パワーPがP0となるまで処理を繰り返す。一方、中心波長パワーPがP0と等しい場合、ステップS32にリターンする。

【0047】すなわち、図7(b)、(c)に示すように、エタロン2の選択波長曲線の最大点の波長 λ_e の前後で発振している場合は、このエタロン2の選択波長曲線の最大点に中心波長 λ_0 が収束する。これは、ステップS47で順次中心波長パワーPがP0に再設定され、選択波長曲線の凸部最大点に段階的に収束するからである。なお、ステップS44における中心波長パワーPとパワーP0とが等しいか否かは、PとP0との差が所定範囲内であるか否かによって判断する。

【0048】このような中心波長制御および重ね合わせ制御によって、共振器による波長選択とエタロンによる波長選択とが適正となって、所望の基本波目標波長 λ_{ot} に制御されるとともに、そのときのパワーも最大となる。

【0049】次に、ステップS5の波長制御処理手順の他の例について説明する。これは、図9(a)~(c)に示すように、共振器の波長選択は、共振器長に応じて複数の選択波長が現れ、共振器長の変化によって選択波長が全体的に間隔を変えながらシフトし、エタロンによる選択波長も同様に複数現れるが、共振器による選択波長の間隔に比べて大きいいため、エタロンによる選択波長と共振器による選択波長とが大きくずれている場合には、まずエタロンによる選択波長を調整した方が効率的かつ確実に波長制御を行うことができるからである。

【0050】ここで、FSRとは上述した複数の選択波長間の波長差を意味し、共振器のFSRであるFSRcは、

$$FSRc = \lambda^2 / (2nL)$$

で表され、エタロンのFSRであるFSReは、

$$FSRe = \lambda^2 / (2nd)$$

で表される。なお、「 λ 」はべき乗、「n」は自然数、「L」は共振器長、「d」はエタロン2内のミラー間距離を示す。

【0051】従って、他の波長制御処理では、図9(a)に示すように、現在の基本波波長 λ_0 と基本波目標波長 λ_{ot} とのずれ $\Delta\lambda$ がFSRc/2より大きい場合には、エタロン2の選択波長の制御を先に行うようにしている。

【0052】すなわち、図8において、まず $\Delta\lambda$ がFSRc/2より大きいのか否かを判断する(ステップS51)。大きい場合には、エタロン2の選択波長を $\Delta\lambda$ 変化させ(ステップS54、図9(b))、その後、共振

器の選択波長が $\Delta\lambda$ 変化するように共振器長を変化させ(ステップS55、図9(c))、ステップS5にリターンする。

【0053】一方、 $\Delta\lambda$ がFSRc/2よりも大きくない場合には、図5のステップS31に示す中心波長制御と同じ中心波長制御処理を行い(ステップS52)、さらに図5のステップS32に示す重ね合わせ制御と同じ重ね合わせ制御処理を行い(ステップS53)、細かい波長制御を行って、ステップS5にリターンする。

【0054】このような他の波長制御処理を含めた基本波に対する波長制御を行うと、基本波の4倍の高調波に対する波長制御に比べて高い精度をもった波長制御を行うことができ、狭帯域化を容易にするとともに、波長領域が可視領域であって低いため、波長モニタ6が用いる光学素子が豊富であり、さらに高精度の波長制御を容易に実現できる。

【0055】例えば、図10は、図2の波長制御装置による波長制御にさらに吸収セル波長検出部を付加した第2の実施の形態である波長制御装置を示し、この吸収セル波長検出部を用いて基本波光L1の波長をさらに高精度に調整することができる。このような吸収セル波長検出部を用いることができるのは、上述したように基本波光が可視領域であるからである。

【0056】すなわち、図10において、ビームスプリッタ5によってサンプリングされた基本波光L1は、波長モニタ6に入射される途中の光路に設けられたビームスプリッタ40によってさらに基本波光がサンプリングされる。このサンプリングされた基本波光L1の一部は、吸収セル波長検出部41内に入力され、所定の吸収ラインを有するガスセル42を透過し、吸収セル波長検出部は、フォトセンサ43によって光強度を検出する。この光強度に応じて波長コントローラ7が光強度が最小となるように波長制御を行い、最小のときの基本波光の干渉縞を波長モニタによって記憶しておくことにより、波長の較正処理を行うことができる。ここで、光強度が最小のときの基本波波長とガスセル42の吸収ラインとが一致しなくても、吸収ラインの波長が既知であるため、この既知の波長をもとに波長モニタ6が較正され、現在の基本波波長を検出することができる。この基本波波長の較正処理を定期的に行い、上述した波長制御処理に付加することによってさらに高精度の波長制御が可能となる。

【0057】この吸収セル波長検出部41の制御処理およびこの検出結果を用いた較正処理の手順について図11に示すフローチャートを参照して説明する。

【0058】図11(a)において、波長コントローラ7は、タイマの時間Tが所定周期Kを超えたか否かを判断し(ステップS61)、所定周期Kを超えた場合、波長較正モードに設定してこの時の基本波の初期波長を設定する(ステップS62)。その後、この初期波長にお

ける吸収セル42を透過した光強度P10をフォトセンサ43によって検出する(ステップS63)。さらに、基本波波長(初期波長)を所定波長分プラス側に变化させる波長制御を行う(ステップS64)。その後、变化した基本波波長において吸収セルを透過した光強度P11を検出する(ステップS65)。その後、光強度P11がP10より大きいかなかを判断し(ステップS66)、光強度P11がP10より大きくない場合は、P11をP10に設定し(ステップS60)、ステップS64に移行し、光強度が最小となる波長に制御する。一方、光強度P11がP10より大きい場合、ガスセル42による吸収が大きいため、このガスセル42の吸収ラインと現在の基本波波長とが一致するので、このときの基本波の干渉縞を較正時の干渉縞として波長モニタに記憶させる(ステップS67)。その後、タイマの時間Tを0にリセットして(ステップS68)、本処理を終了する。

【0059】一方、この較正時の干渉縞を用いた較正処理は、図11(b)に示すように、まず、通常時において基本波光の干渉縞を波長モニタ6によって検出し(ステップS71)、その後、この基本波光の干渉縞と図11(a)のステップS68で記憶した較正時の干渉縞とから基本波光の絶対波長 λ_0 を算出し(ステップ72)、これにより、絶対波長 λ_0 をさらに精度高く算出し、ひいては精度の高い波長制御が可能となる。

【0060】なお、このような較正処理は、波長モニタ6内のモニタエタロン33の安定性を考慮して、定期的に行えばよい。

【0061】次に、第3の実施の形態について説明する。第1及び第2の実施の形態では、チタンサファイヤレーザ10の基本波光L1をそのまま波長変換部12に入力するようにしているが、第3の実施の形態では、さらにこの基本波光L1を波長変換せずに増幅する基本波増幅段を介在させている点が第1及び第2の実施の形態とは異なり、その他の構成は同じである。

【0062】すなわち、図12は、第3の実施の形態であるインジェクションロック型狭帯域レーザの概要構成を示し、チタンサファイヤレーザ10と波長変換部12との間にチタンサファイヤレーザ10が出力した基本波光を増幅する基本波増幅段Cを設けている。この場合、ポンピングレーザ11からのポンピング光L0は、ビームスプリッタ50を介して、チタンサファイヤレーザ10のみならず、全反射ミラー51を介して基本波増幅段Cにも入力される。これにより、最終出力光の出力が大幅にアップすることになる。

【0063】なお、図12では、チタンサファイヤレーザ10の基本波光L1をモニタして波長制御する構成となっているが、これに限らず、基本波増幅段Cからの出力光を一部サンプルしモニタすることによって、チタンサファイヤレーザ10の波長制御を行うようにしてもよ

い。

【0064】さらに、この基本波増幅段C内に波長選択素子を配置し、基本波増幅段Cからの出力光を一部サンプルしモニタした結果を該波長選択素子にフィードバックすることによって波長制御するようにしてもよい。

【0065】また、この場合、基本波増幅段Cがリング共振器によって実現される場合には、このリングレーザの共振器長を変化させて波長制御を行うようにしてもよい。

【0066】次に、図13を参照してリアミラーがグレーティング機能を有する場合のチタンサファイヤレーザ10内における波長制御のための構成について説明する。

【0067】図13において、グレーティング機能を有するリアミラー61とフロントミラー64とで構成される共振器内にポンピングレーザ71からのポンピング光が入射すると、チタンサファイヤロッド3はレーザ光を発生し、共振器、および波長選択素子としてのエタロン62とリアミラー(グレーティング)61とによって狭帯域化された773.6nmの基本波光L11が出力される。基本波光L11の一部は、ビームスプリッタ65によってサンプルされて取り出され、波長モニタ66内に入力される。

【0068】波長モニタ66は、ビームスプリッタ65からの基本波光L11を散乱板81によって散乱し、この散乱された光はビームスプリッタ82を介してモニタエタロン83に入射され、集光レンズ84を介してラインセンサ85上に干渉縞を生成する。一方、773.6nmの基本波光の波長に近い基準光としての772.376nmラインを発光するアルゴンランプ86がコレクタレンズ87の焦点に配置され、干渉フィルタ88によってアルゴンランプ86が発生する光のうち772.376nmの光のみを透過させ、この透過した基準光は、ビームスプリッタ82、モニタエタロン83、集光レンズ84を介してラインセンサ85上に干渉縞を生成する。ラインセンサ85によって撮像された基本波光および基準光の干渉縞は、波長コントローラ67に送出される。

【0069】波長コントローラ67は、基本波光の干渉縞と基準光の干渉縞とを比較することによって、現在の基本波光の絶対波長を算出し、増幅段B1から出力される出力光L13の波長193.3nmの4倍の波長である基本波目標波長とのずれを算出し、このずれを補正すべくドライバ68を介してエタロン62、リアミラー61のグレーティング角度、共振器長変化のためのリアミラー61の位置を制御して波長制御を行う。

【0070】次に、図14から図17を参照して、波長コントローラ67の波長制御処理について説明する。基本的には、図3から図9に示す波長制御手順と同じであるが、リアミラー61をグレーティングとしているの

で、このグレーティングによる波長制御処理も加わることになる。

【0071】図14は、波長コントローラ67による波長制御処理の全体フローチャートであり、図3に示す波長制御処理とはほぼ同じであるが、ステップS85における波長制御処理にグレーティング制御が含まれるため、若干異なる。

【0072】図15は、ステップS85における波長制御処理手順を示すフローチャートであり、まず、基本波波長 λ_0 と基本波目標波長 λ_{ot} との差 $\Delta\lambda$ と、中心波長パワーPとを読み込む(ステップS91)。

【0073】その後、現在の中心波長パワーPが予め設定した所定のパワーPLよりも小さいか否かを判断し(ステップS92)、小さい場合には、この中心波長パワーPが最大となるようにグレーティング61の角度を変化させ、このグレーティング61による波長選択を行う(ステップS93)。さらに、中心波長パワーPが最大となるようにエタロン62の選択波長を変化させ(ステップS94)、その後ステップS91に移行し、処理を続行する。ここで、図16(a)に示すように、グレーティングの選択波長の間隔は、エタロンの選択波長間隔よりも大きい。従って、グレーティングによる選択波長、エタロンによる選択波長、共振器長による選択波長の順序で選択波長の間隔は狭くなり、より微細な波長選択が行われることになる。ステップS93及びS94の処理は、図16(a)の状態から図16(b)の状態に変化させることであり、グレーティングの選択波長曲線Cgの最大点とエタロンの選択波長曲線Ceの最大点とを現在の発振波長に一致させることによって最大パワーを得ている。

【0074】次に、ステップS92で中心波長パワーPが所定のパワーPLよりも小さくない場合は、さらに $\Delta\lambda$ がFSRe/2より大きいと判断し(ステップS95)、小さくない場合には、グレーティングの選択波長を $\Delta\lambda$ 変化させ(ステップS96、図16(c))、グレーティングの選択波長の最大点を基本波目標波長 λ_{ot} に一致させる。さらに、最大パワーとなるように、エタロンの選択波長を変化させる(ステップS97、図16(d))。その後、ステップS91に移行し、処理を続行する。これにより、現在の発振波長がより基本波目標波長 λ_{ot} に近づくことになる。

【0075】次に、ステップS95で $\Delta\lambda$ がFSReより大きくない場合は、さらに $\Delta\lambda$ がFSRc/2より大きいと判断し(ステップS98)、大きい場合は、エタロンの選択波長を $\Delta\lambda$ 変化させ(ステップS99、図17(a))、最大パワーとなるように、PZT69を駆動して共振器長を変化させ、共振器の選択波長を変化させる(ステップS100、図17(b))。その後、ステップS91に移行し、処理を続行する。

【0076】さらに、ステップS98で $\Delta\lambda$ がFSRc

/2より大きくない場合は、共振器の選択波長を $\Delta\lambda$ を変化させ(ステップS101、図17(b))、最大パワーとなるように、エタロンの選択波長を変化させ(ステップS102、図17(b))、さらに最大パワーとなるように、グレーティングの選択波長を変化させる(ステップS103、図17(b))。この場合、 $\Delta\lambda$ はFSRc/2内であるので、まず共振器の選択波長を $\Delta\lambda$ 変化させることにより、精度の高い波長制御がなされることになる。その後、ステップS85にリターンする。

【0077】このような波長制御を行うことにより、段階的に確実に所望の狭帯域化された基本波目標波長 λ_{ot} に調整することができる。

【0078】次に、第4の実施の形態について説明する。第4の実施の形態では、第1から第3の実施の形態がいずれもオシレータ段内から波長をモニタして波長制御を行っていたのに対し、波長変換部12内のレーザ光の波長をモニタして波長制御を行うようにしている。

【0079】すなわち、図18は、第4の実施の形態であるインジェクションロック型狭帯域レーザの概要構成を示す図であり、波長モニタ6は、波長変換部12から波長を検出するようにしている。波長変換部12は、上述したように和周波混合によって基本波光L1の波長 ω を順次3つの波長変換素子93～95によって順次波長2 ω 、波長3 ω 、波長4 ω に変換している。そこで、波長変換素子93に入力される波長 ω をビームスプリッタ96でサンプルして取り出し、または波長変換素子93と波長変換素子94との間の波長2 ω をビームスプリッタ97でサンプルして取り出し、または波長変換素子94と波長変換素子95との間の波長3 ω をビームスプリッタ98でサンプルして取り出すようにする。これらのビームスプリッタ96～98は、いずれか1つを設けてよいし、これらを適切に組み合わせるような構成としてもよい。いずれか1つを設ける構成の場合には、波長モニタ6および波長コントローラ7は、取り出される波長を制御することが必要であり、適切に組み合わせた構成とした場合、波長モニタおよび波長コントローラ7は、これらの取り出された波長を全て制御することが必要である。複数の波長を制御することによって、さらに精度の高い波長制御が可能となる。

【0080】このようにして、上述した実施の形態では、それぞれの検出した波長に応じた精度、例えば最終的な出力光の波長が4 ω の場合で波長 ω の基本波光をモニタする場合には4倍精度が向上し、波長2 ω の基本波光をモニタする場合には2倍精度が向上し、最終的な出力の波長が3 ω の場合で波長 ω の基本波光をモニタする場合には3倍精度が向上した波長制御を行うことができるとともに、制御する周波数領域が低いと、波長モニタが波長制御する際の光学素子が豊富であり、精度の高い波長制御が可能となり、かつ光学素子の寿命を格段に

向上させることができる。

【0081】なお、上述した第1から第4の実施の形態は適宜組み合わせが可能である。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の第1の実施の形態であるインジェクションロック型狭帯域レーザの全体構成を示す図である。

【図2】図1のチタンサファイヤレーザ10内の波長制御の構成を示す図である。

【図3】波長コントローラ7の波長制御処理手順を示す全体フローチャートである。

【図4】ステップS3の基本波波長検出処理手順およびステップS11の基本波光の干渉縞検出処理手順を示すフローチャートである。

【図5】ステップS5の波長制御処理手順を示すフローチャートである。

【図6】ステップS32の重ね合わせ制御処理手順を示すフローチャートである。

【図7】波長制御時における波長に対する光強度の関係を示す図である。

【図8】ステップS5における別の波長制御処理手順を示すフローチャートである。

【図9】図8に示す波長制御時における波長に対する光強度の関係を示す図である。

【図10】吸収セル波長検出部を付加して波長制御を行う第2の実施の形態の構成を示す図である。

【図11】吸収セル波長検出部の処理結果を用いた較正処理手順を示すフローチャートである。

【図12】本発明の第3の実施の形態であるインジェクションロック型狭帯域レーザの全体構成を示す図である。

【図13】リアミラーがグレーティング機能を有する場合のチタンサファイヤレーザ10の波長制御の構成を示す図である。

【図14】波長コントローラ67の波長制御処理手順の

全体フローチャートである。

【図15】ステップS85の波長制御処理手順を示すフローチャートである。

【図16】ステップS85の波長制御時の波長に対する光強度の関係を示す図である。

【図17】ステップS85の波長制御時の波長に対する光強度の関係を示す図である。

【図18】本発明の第4の実施の形態であるインジェクションロック型狭帯域レーザの全体構成を示す図である。

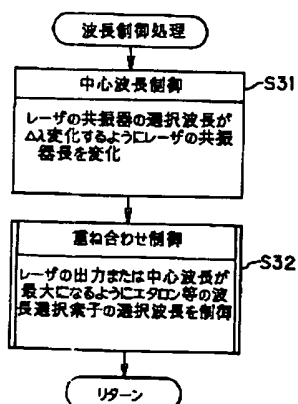
【図19】従来の狭帯域化エキシマレーザの概要構成を示す図である。

【図20】従来のインジェクションロック型狭帯域レーザの構成を示す図である。

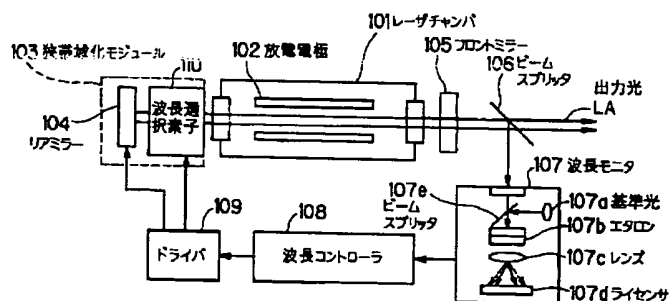
【符号の説明】

1…リアミラー 2…波長選択素子(エタロン)
3…増幅媒体(チタンサファイヤロッド) 4…フロントミラー
5, 32…ビームスプリッタ 6…波長モニタ 7…波長コントローラ
8…ドライバ 9…PZT 10…チタンサファイヤレーザ
11…ポンピングレーザ 12…波長変換部 13, 14…全反射ミラー
21…凸面ミラー 22…凹面ミラー 23…放電電極
24…チャンバ
A…オシレータ段 B…増幅段 31…拡散板 33…モニタエタロン
34…集光レンズ 35…ラインセンサ 36…アルゴンランプ
37…コリメータレンズ 38…干渉フィルタ L1…基本波光
L2…高周波光 L3…出力光

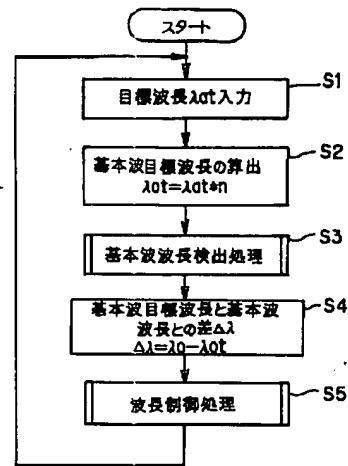
【図5】



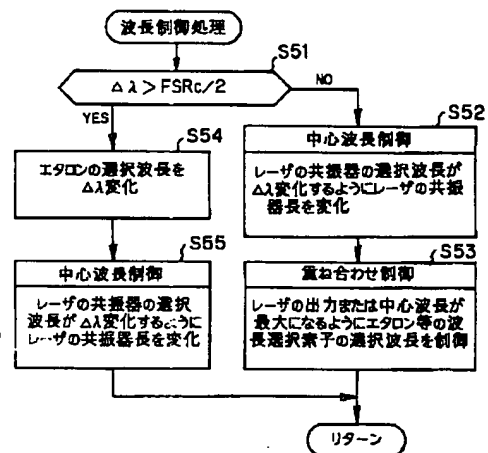
【図19】



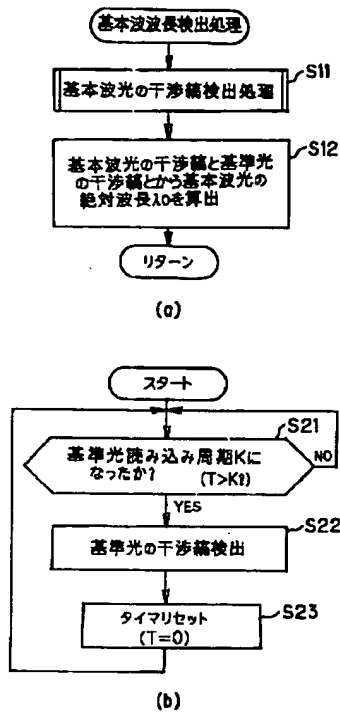
【図3】



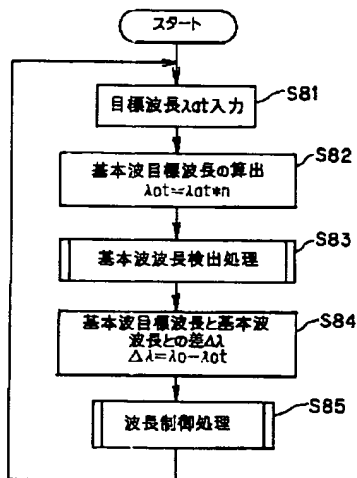
【図8】



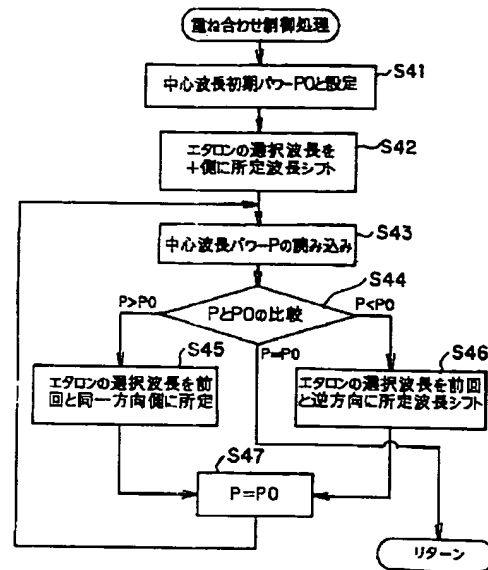
【図4】



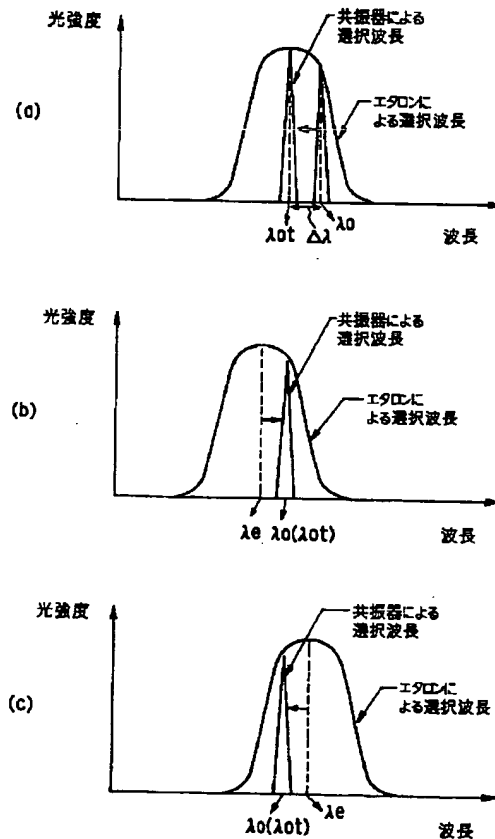
【図14】



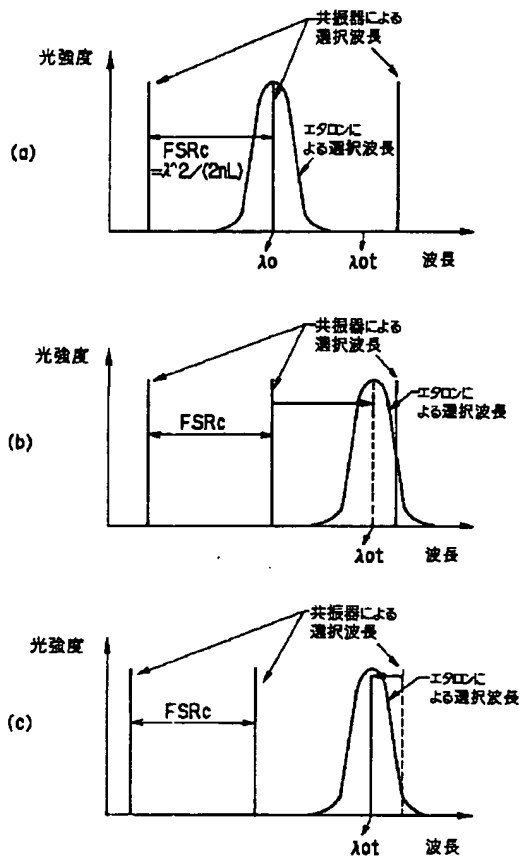
【図6】



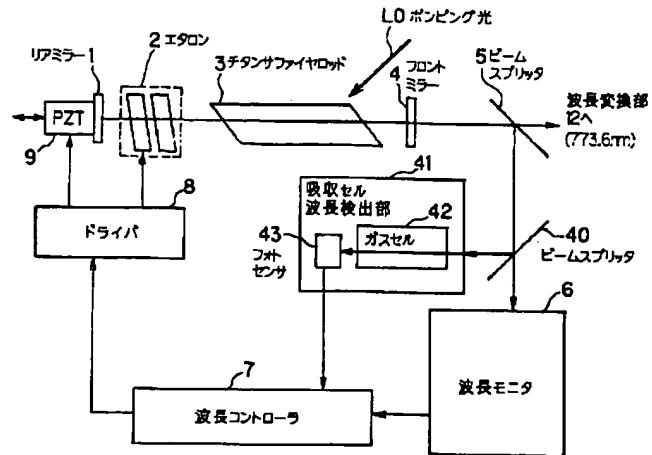
【図7】



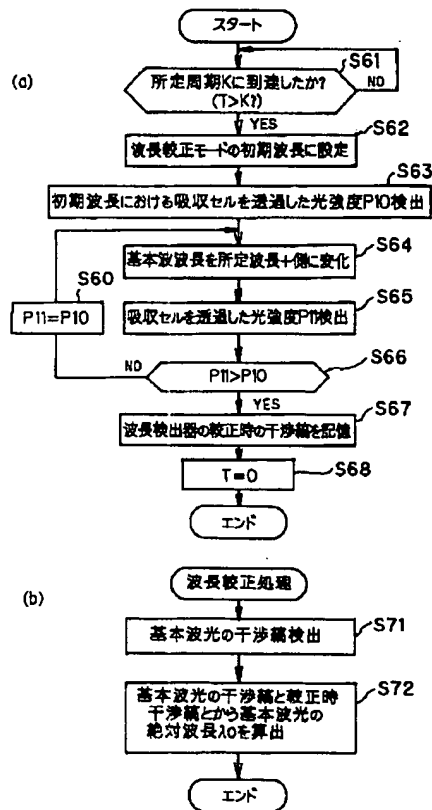
【図9】



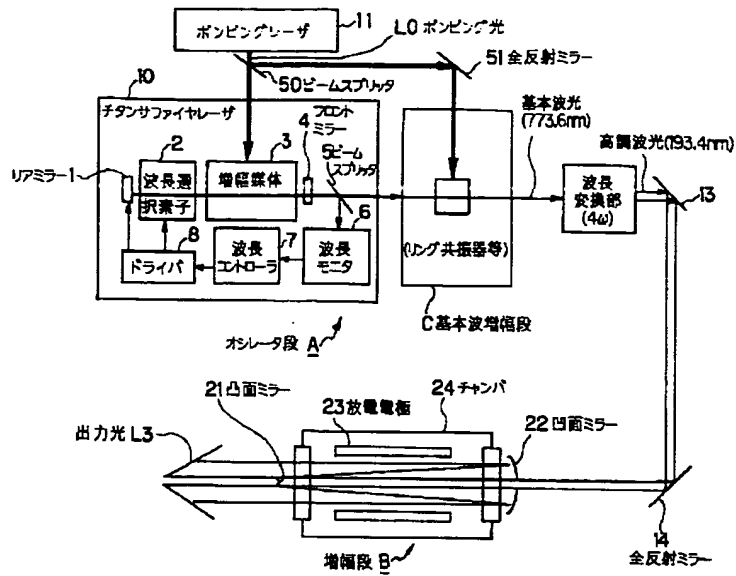
【図10】



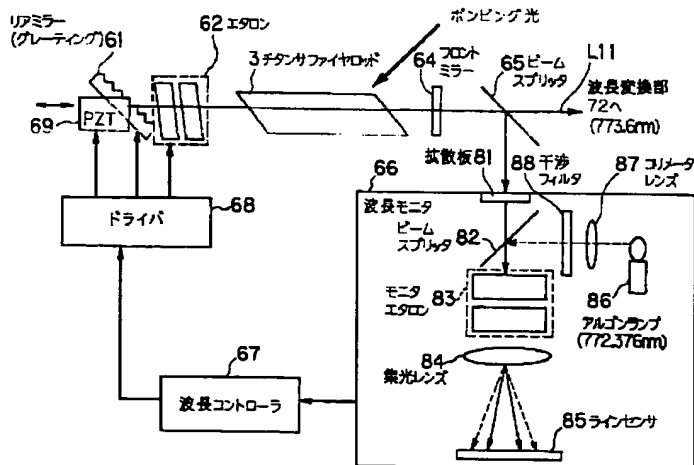
【図11】



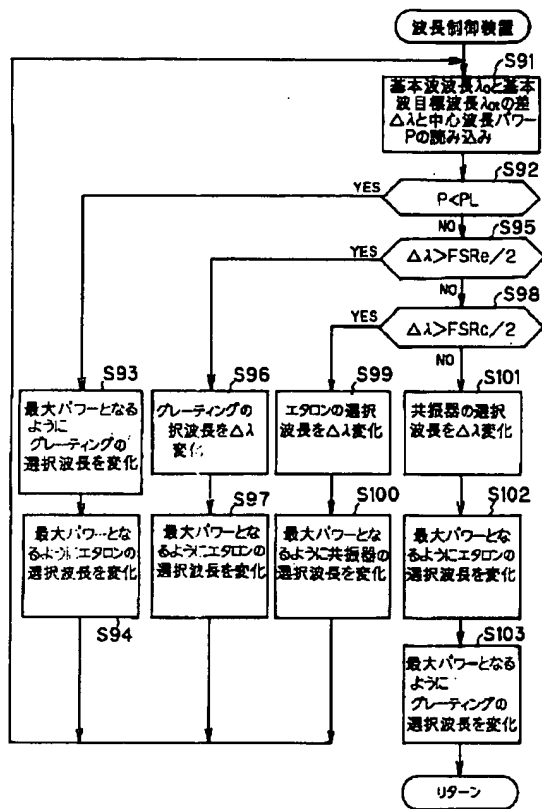
【図12】



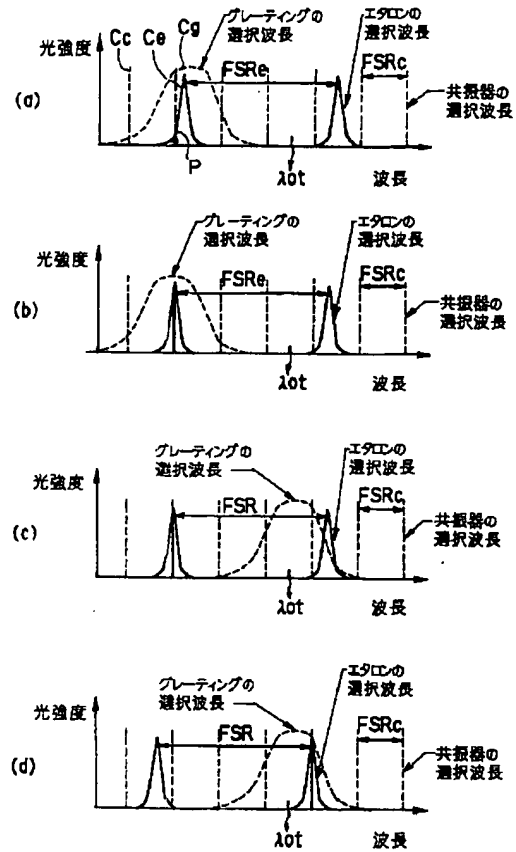
【図13】



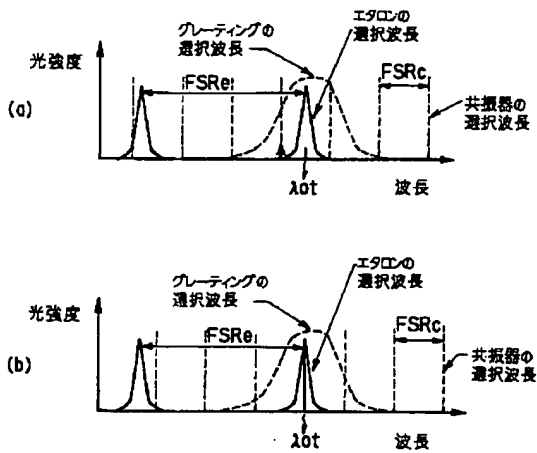
【図15】



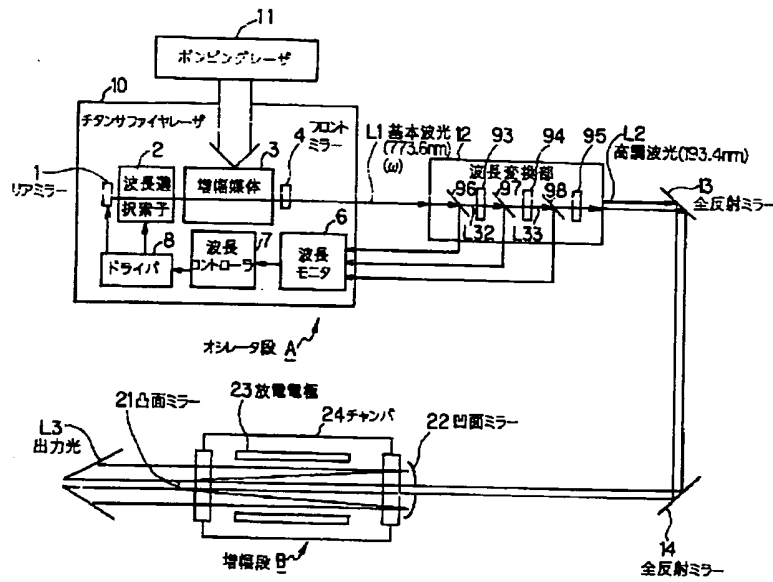
【図16】



【図17】



【図18】



【図20】

